

- 鉄道一般
- 車両
- 軌道
- 構造物
- 防災
- 電力
- 信号通信情報
- 材料
- 環境
- 人間科学
- 浮上式鉄道

車輪・レールの境界と接点： 接触面に介在する物質を現場で分析する

鉄さびや油、落ち葉などのレールの表面に付着しているさまざまな物質には、車輪／レール間の粘着現象や電気的現象に影響を与え、車輪の空転・滑走やレールの異常摩耗、軌道回路の短絡不良などの一因となるものがあることが知られています。これらの現象についての知見を得る手段の一つとして、車輪／レール間介在物の種類や成分を分析する代表的な手法を解説します。さらに、最も代表的な車輪／レール間介在物である鉄さびを、X線を使用した分析装置により現場で分析した事例を紹介します。



鈴木 淳一
Junichi Suzumura
材料技術研究部
潤滑材料研究室
副主任研究員
[専門分野] 潤滑油・グ
リース、潤滑剤劣化分
析、トライボロジー

車輪とレールの接点

一般的な鉄道は、2本の鋼鉄製のレールで形成された支持案内路の上を、鋼鉄製の車輪を有する車両が運行されるシステムとなっています。車両の下端と軌道の上端の境界が車輪とレールの接点であり、車両の重量により車輪とレールの双方が変形することで、約1cm²の接触面が形成されます。車輪とレールの接触面は、鉄道システムの中で2つの大きな役割を持っています。1点目は、鉄同士の摩擦によって列車を加速させるための駆動力やブレーキ力を伝達する働き、すなわち「粘着」と呼ばれる現象です。列車の最高運転速度やブレーキ減速度、車輪の空転や滑走など、列車の運転に関する多くの要素は、車輪／レール間の粘着力（車輪が転がり接触状態にあるときに、レールの長手方向に働く接線力）

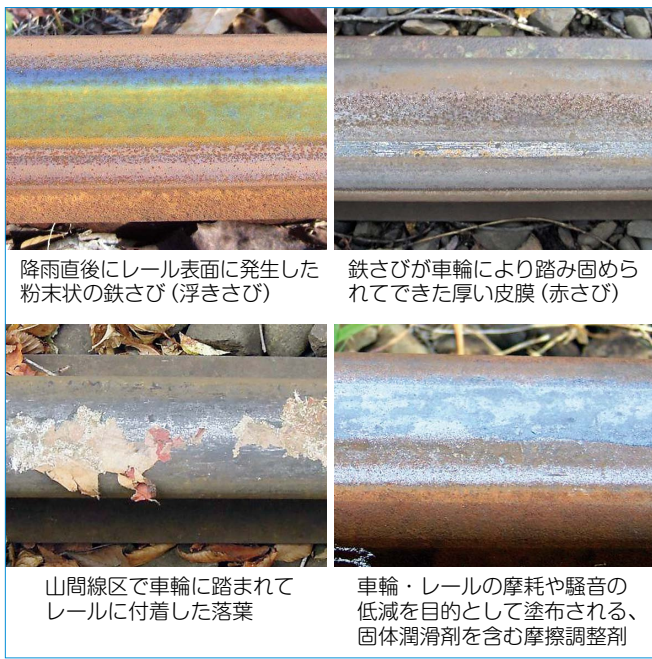
に支配されます。2点目は、電気接点としての役割です。電気鉄道において、パンタグラフなどの集電装置により電気車内に取り込まれた電流は、車輪とレールの接触面からレールを経由して変電所に帰還します（帰線電流）。また、レールを電気回路の一部として使用し、車両の車輪と車軸により回路を短絡させることで列車の有無や位置情報を検知する信号システム（軌道回路）においても、車輪とレールの接触面が電気接点として重要な役割を果たしています。

車輪／レール間介在物

車輪とレールの接触面においては、通常はさまざまな物質が介在した状態で車両はレール上を走行しています。表1に車輪／レール間介在物の例を、図1にさまざまな物質が付着したレールの例を示します。降雨や結露な

表1 車輪／レール間介在物の例

レール周辺の環境、気象現象により介在する物質	水（降雨、結露、霧、トンネル内漏水）、雪、氷（霜）、鉄さび、植物、昆虫、海水、砂塵、火山灰
意図的に介在させる物質	潤滑剤（油、グリース）、摩擦調整剤、増粘着剤（砂、セラミックス）、摩擦緩和材
列車の運行により介在する物質	摩耗粉（車輪／レール、ブレーキ制輪子）、油煙



降雨直後にレール表面に発生した粉末状の鉄さび(浮きさび)

鉄さびが車輪により踏み固められてできた厚い皮膜(赤さび)

山間線区で車輪に踏まれてレールに付着した落葉

車輪・レールの摩耗や騒音の低減を目的として塗布される、固体潤滑剤を含む摩擦調整剤

図1 さまざまな物質が付着したレールの例

どによりレール上に発生する水や、鉄が水と酸素により酸化されて発生する鉄さびは、最も代表的な車輪／レール間介在物として挙げられます。車輪／レール間に水が介在すると、乾燥状態と比較して粘着係数(最大粘着力を輪重で除した値)が小さくなるため、車輪の空転や滑走の原因となることがあります。また、レール表面には、レール周辺の環境や雰囲気に応じて複数の種類の鉄さびが発生し、それらが車輪／レール間の粘着に及ぼす影響は種類により異なることが過去の研究により明らかになっています¹⁾。鉄さびは一般的に絶縁性を持つことから、レールの走行面上に厚い鉄さびの皮膜が形成された場合は、軌道回路の短絡を阻害することが知られています²⁾。

車輪／レール間の粘着力低下により車輪の空転や滑走が発生した場合、粘着係数を増加させることを目的として、車輪とレールの接触面に砂やセラミックス系増粘着剤を意図的に散布する対策がとられることがあります。さらに、車輪およびレールの摩耗や列車走行時の騒音を低減させる目的で、車

輪／レール間潤滑剤(潤滑油、グリースおよび固体潤滑剤を含む摩擦調整剤など)が使用される場合がありますが、これらの列車運行のために意図的に介在させる物質も車輪／レール間介在物と言えます。

このように、車輪とレールの接触面に種々の物質が介在した状態で列車は運行されており、介在物の特性が車輪／レール間の粘着現象や電氣的現象に大きな影響を及ぼします。したがって、さまざまな分析的手法を用いて車輪／レール間介在物の種類を特定し、接触面の状態を把握することは、車輪とレールの接触により生じる諸問題についての知見を得るうえで極めて重要であると考えられます。

介在物の採取方法

車輪／レール間介在物の分析を行う際には、試料をレール頭頂面(車輪が接触する部分)や車輪踏面から適切な方法で採取する必要があります。介在物採取方法の例を図2に示します。例えば、レール表面に強固に付着している鉄さびについては、セラミック製の



固体状付着物はセラミックススクレイパーなどを使用して削り取る

潤滑剤や摩擦調整剤は、溶剤に浸したガーゼや脱脂綿などでふき取る

図2 車輪／レール間介在物採取方法の例

スクレイパーを用いてレール表面を削ることで粉末状の試料として採取することができます。また、潤滑油や摩擦調整剤については、適当な溶剤で湿らせたガーゼや脱脂綿でレール頭頂面や車輪踏面を拭き取ることで採取することができます。

介在物の分析方法

以上のようにして採取された車輪／レール間介在物の試料は、さまざまな分析装置を用いることでその成分や元素、分子構造などを調べることができます。以下に代表的な分析方法と原理を紹介します。

(1) 赤外分光法(IR法)

物質(主に有機化合物)に赤外線を入射すると、物質を構成する分子の振動に応じた波長の赤外線が吸収される現象を利用した分析方法です。照射した赤外線の波数(波長の逆数)を横軸に、吸光度を縦軸にとることで得られる赤外吸収スペクトルは分子固有であるため、既知物質のスペクトルと比較することで物質を同定することができます。IR法は気体・液体・固体を問わず、また微量の試料でも短時間で測定が可能なことから、車輪／レール間介在物の中でも、鉄さび、落ち葉、潤滑油・グリースなどの分析に特に適しています。

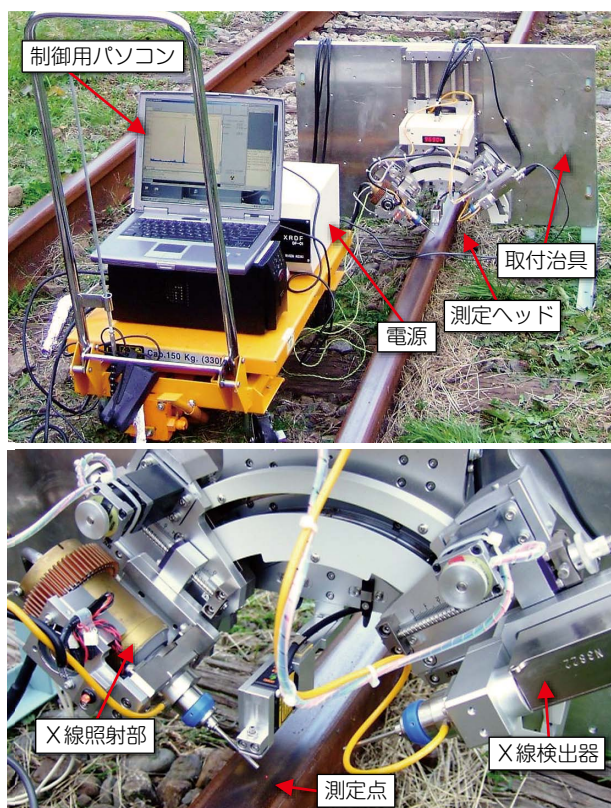


図3 XRFによるレール測定

(2) ラマン分光法

物質にレーザー光を入射すると、物質を構成する分子の振動に応じて入射光とは異なる波長の光が散乱される現象(ラマン散乱)を利用した分析方法です。IR法と同様に分子構造を解析する手法ですが、試料を破壊せずに分析することができるという利点があります。主に鉄さびや炭素材料などの分析に用いられます。

(3) 蛍光X線分析法(XRF法)

物質にX線を照射すると、その物質を構成している元素に固有のエネルギーをもつX線(蛍光X線)が、元素の量に応じて放出される現象を利用した、代表的な非破壊元素分析法です。摩擦調整剤や塵埃^{じんあい}などの分析に多く用いられます。

(4) X線回折分析法(XRD法)

結晶構造を有する物質(主に無機化合物)にX線を入射すると、結晶を構成する規則的な原子の配列(結晶構造)

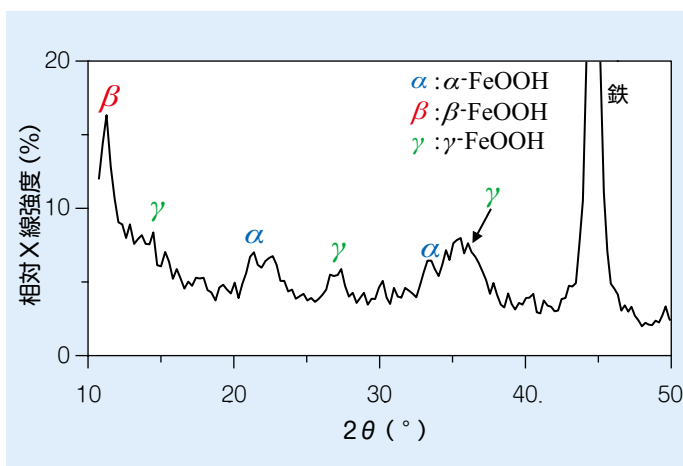


図4 塩水散布によりさびを発生させたレールのX線回折パターン

に応じて、特定の入射角度のときだけにX線が反射される現象(X線回折)を利用して化合物の種類を同定する方法です。車輪/レール間介在物の中でも、鉄さび

や砂塵^{さじん}、塩分などに対しては高感度で分析を行うことができます。

(5) 誘導結合プラズマ発光分光分析法(ICP法)

液体状に処理した試料を高温のプラズマ中に噴霧し、分解された試料中の原子が発する元素に固有な波長の光を分光器で測定することにより、試料中に含まれている元素の種類を解析する分析手法です。複数の元素を同時に定量分析を行うことができます。主に潤滑油・グリースや摩擦調整剤、塩分などの分析に用いられます。

現場分析の有用性

通常は現場で採取した試料を実験室に持ち帰り、各種分析を行います。近年、小型で持ち運びが可能な分析装置が開発され、分析装置を現場に持ち込み、時間をおかずに現場で分析を行うことが可能になりました。現場分析を行う利点は以下の2点が挙げられま

す。1点目は、試料を採取してから分析を行うまでの間の成分の変化が無視できる点です。例えば、落ち葉など植物由来の物質は採取してから時間が経過すると、一部成分の揮発や、微生物などによる腐食などが起こります。また、鉄さびの中でも塩水環境下で生成する種類のものは、空気中の酸素や水分により容易に組成が変化することが知られています^{1),3)}。2点目は、車輪やレール表面のより狭い範囲における介在物の情報を得ることができ、かつ経時変化も追跡できる点です。実験室で分析を行う場合、試料の量が多いほど分析精度が高くなるため、通常は車輪やレール表面上のある程度広い範囲から試料を採取します。また、車輪/レール接触面(特にレール走行面)の状態は季節や天候はもちろんのこと、1日の中の時間帯や列車の通過によって大きく変化する場合があります。試料を採取することなく現場で非破壊分析を行うことにより、例えばある地点のレールにおいて、始発列車の前から列車の通過や周辺の雰囲気変化による表面に付着している物質の変化を調べることも可能です。

このように、車輪/レール間介在物の現場分析は、車輪とレールの接触問題を解明するための非常に有用な手段

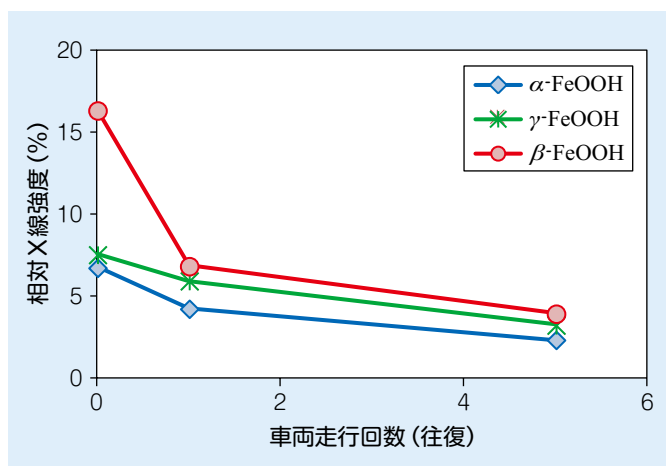


図5 外軌レールゲージコーナーに発生させた鉄さびの車両の走行に伴う変化

の一つになることから、鉄道総研ではこれまでにIR法、ラマン法、XRF法、XRD法を用いた現場分析法の開発に取り組んできました。以下に、最も代表的な車輪／レール間介在物である鉄さびを、X線を使用した分析装置を使用して、現場で分析した事例を紹介します³⁾。

X線装置を使用した鉄さびの現場分析

降雨や結露などによってレール表面に水滴が付着すると、水中に鉄イオンが溶出し、水が蒸発する際に空気中の酸素により酸化され、鉄さびが生成します。これがいわゆる「浮きさび」の状態です。車輪の通過により一部が取り除かれますが、閑散線区では列車が通過しない時間帯にさらにさびが発生し、車輪に踏み固められることを繰り返して、数マイクロメートル程度の厚さの茶褐色の皮膜（赤さび）が形成されます（図1参照）。レール表面に一般的に見られる赤さびの成分は、オキシ水酸化鉄（FeOOH）と呼ばれる化合物で、結晶構造の違いにより α 型、 β 型、 γ 型などの複数の種類があり、それぞれ車輪／レール間の粘着に及ぼす影響が異なることが知られています^{1), 3)}。例えば、海浜環境などの塩化物イオン

（Cl⁻）が存在する湿潤環境下で生成する β 型は、湿潤環境下で生成する α 型および γ 型と比較して摩擦係数が小さいことが明らかにされています。

鉄さびの種類を最も感度良く分析することができる方法はXRD法ですが、一般に、X線分析装置は寸法が大きく、現場での使用は困難でした。しかし、近年、主に遺跡や壁画などの文化財を非破壊で分析することを目的として開発された可搬型複合X線分析装置（XRDF）を使用することにより、現場でのXRD分析が可能になりました。この装置は、XRD法による結晶構造解析とXRF法による元素分析を、直径1～6mmの同一測定点で実施することができます。

上記の装置を使用して、鉄道総研内の試験線で現場分析を行いました。レールに塩水を散布して鉄さびを発生させ、試験車両の通過により、レール上の同一点の鉄さびがどのようにに変化するかを調べました。この試験では、軌道内で効率的にXRDFによる分析を行うために、測定するレールをまたぐようにXRDFの測定ヘッド部を固定する取付治具を製作し、使用しました。XRDFによる測定の状況を図3に示します。

塩水散布により表面にさびを発生さ

せたレールをXRDFで測定した結果（X線回折パターン）を図4に示します。横軸が入射X線と回折X線との間の角度 2θ 、縦軸が回折X線の強度を示しています。 α 型、 β 型および γ 型のオキシ水酸化鉄が鉄さびとして生成していることがわかります。また、曲線区間の外軌ゲージコーナーに発生させた鉄さびに対して、試験車両を5往復走行させ、オキシ水酸化鉄の量がどのように変化するかを調べた結果を図5に示します。縦軸の相対X線強度が、それぞれのさびの相対的な量に相当します。試験車両が1往復走行するだけで多くの鉄さびが除去されることがわかりました。

おわりに

車輪／レール間に介在する種々の物質は、車輪／レール間の粘着現象や電気的現象に影響を与えるため、適切な手法で分析を行い、接触面の状態を正確に把握することが、それらの現象に対する対策を検討する上で重要です。本稿で紹介した現場分析法はそのための有効な手段になることが期待されます。今後、現地試験などにより現場分析法の精度および簡便性のさらなる向上に取り組む予定です。RRR

文献

- 1) 伴巧：車輪とレールの間介在する物質が起こす現象，RRR，Vol.65，No.8，pp.10-13，2008
- 2) 福田光芳，板垣朋範，寺田夏樹：軌道回路の短絡不良要因と改善手法，鉄道総研報告，Vol.21，No.11，pp.5-10，2007
- 3) 鈴木淳一，曾根康友，石崎温史，山下大輔，中島嘉之：車輪／レール間介在物質の現場分析法の開発，鉄道総研報告，Vol.26，No.12，pp.29-34，2012